

рис.3 - График зависимости индуктивности от емкости

Список публикаций:

- [1] Tellegen B.D.H. The gyrator, a new electric network element // Philips Res. 1948. V.3. Issue 81. P.388-409.  
 [2] Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах / М.И. Бичурин, В.М. Петров, Д.А. Филиппов, Г. Сринивасан; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2005 – 226с.  
 [3] A Highly Efficient Self-Biased Nickel-Zinc Ferrite/Metglas/PZT Magnetolectric Gyrator Chung Ming Leung, G. Sreenivasulu, Xin Zhuang, Xiao Tang, Min Gao, Junran Xu, Jiefang Li, Jitao Zhang, G. Srinivasan, and D. Viehland Phys. Status Solidi RRL 2018.

## Влияние размагничивающих полей на краях тонких пленок на параметры эффективной магнитной анизотропии: теория и эксперимент

Скоморохов Георгий Витальевич

Соловьев Платон Николаевич, Изотов Андрей Викторович, Беляев Борис Афанасьевич

Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

[tornadobak@mail.ru](mailto:tornadobak@mail.ru)

Одним из главных отличий наноматериалов от их массивных «собратей» является решающая роль поверхности при формировании свойств всего материала. В частности, в магнитных наноструктурах такие явления как поверхностная магнитная анизотропия, обменное межслоевое взаимодействие, механические напряжения на границах раздела поверхностей во многом определяют характеристики образцов в целом. В настоящей работе, теоретически и экспериментально исследуется влияние размагничивающих полей, возникающих на краях тонких магнитных пленок, на их эффективную магнитную анизотропию.

Методом DC-магнетронного распыления были изготовлены тонкие пленки пермаллоя толщиной 60 нм. Пленки осаждались во внешнем магнитном поле  $H$ , которое индуцировало в них одноосную магнитную анизотропию, с осью легкого намагничивания (ОЛН) направленной параллельно полю  $H$ . С помощью сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса (ФМР) [1], при фиксированной частоте возбуждающего поля 2.3 ГГц, были измерены угловые зависимости резонансного поля на локальных участках (диаметром 1 мм) на поверхности пленки, а из них определены параметры одноосной магнитной анизотропии [2]. Оказалось, что поле эффективной магнитной анизотропии  $H_{\text{keff}}$  увеличивается почти на 20% относительно центра вблизи тех краев пленки, которые были ориентированы параллельно приложенному в ходе напыления образцов магнитному полю  $H$ , и уменьшается примерно на ту же величину вблизи краев, перпендикулярных  $H$  (рис. 1б). Для объяснения обнаруженных эффектов была предложена простая теоретическая модель.

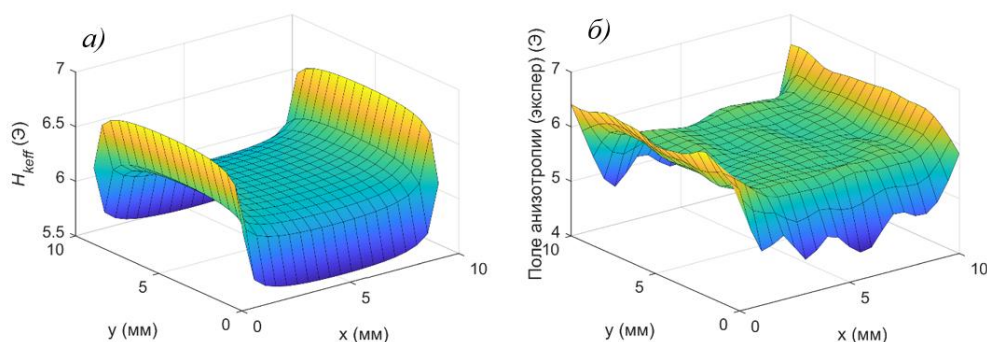


рис.1. Распределение поля эффективной магнитной анизотропии  $H_{\text{keff}}$  по площади пленки, (а) расчет, (б) эксперимент.

Рассмотрим модель тонкой магнитной пленки с одноосной магнитной анизотропией  $H_k$ . Из решения линеаризованного уравнения Ландау-Лифшица можно получить следующее выражение, определяющее собственную резонансную частоту  $\omega_0$  (или резонансное поле  $H_R$  при фиксированной частоте) пленки [2]:

$$\begin{aligned}\omega_0^2 - \Omega_\theta \Omega_z &= 0, \\ \Omega_\theta &= \gamma(H \cos(\theta_H - \theta_M) + H_k \cos 2(\theta_n - \theta_M)), \\ \Omega_z &= \gamma(H \cos(\theta_H - \theta_M) + H_k \cos^2(\theta_n - \theta_M) + 4\pi M).\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь  $\gamma$  – магнитомеханическое отношение,  $M$  – намагниченность насыщения пленки,  $\theta_M$  – угол равновесной намагниченности,  $\theta_H$  – угол ориентации внешнего поля развертки, и  $\theta_n$  – угол направления анизотропии  $H_k$ . Однако у края пленки возникают размагничивающие поля, и поэтому для их учета в выражение (1) необходимо добавить член, описывающий это поле –  $H_d \cos(\theta_M)$ , где  $H_d$  – амплитуда размагничивающего поля, усредненная по локальной области диаметром 1 мм. Размагничивающее поле может быть найдено аналитически [3]. Оно быстро уменьшается с увеличением расстояния от края пленки ( $\sim 1/e^x$ ). С помощью предложенной модели были выполнены расчеты угловых зависимостей резонансного поля, а из них определены параметры эффективной анизотропии (рис. 1а). Учет размагничивающих полей хорошо объясняет данные эксперимента. Действительно, у края пленки, параллельного ОЛН (параллельна  $Oy$ ), при ориентации внешнего поля вдоль ОЛН изменения в величине  $H_R$  относительно центра нет, но при направлении  $H$  вдоль оси трудного намагничивания (ОТН)  $H_R$  увеличивается, т.к. для достижения условия ФМР при заданной частоте необходимо внешним полем компенсировать поле размагничивания. Различие между резонансными полями для ОТН и ОЛН увеличивается, поэтому и увеличивается поле эффективной анизотропии. Однако у края, лежащего вдоль ОТН ( $Ox$ ), компенсация поля размагничивания уже необходима при направлении внешнего поля вдоль ОЛН. В этом случае различие между  $H_R$  вдоль ОЛН и ОТН уменьшается, и, соответственно, у этого края снижается поле эффективной анизотропии относительно центра образца. Хорошее совпадение рассчитанных и измеренных угловых зависимостей резонансного поля (рис. 2), а также теоретического и экспериментального распределения поля анизотропии по площади пленки (рис. 1) доказывает достоверность предложенной модели.

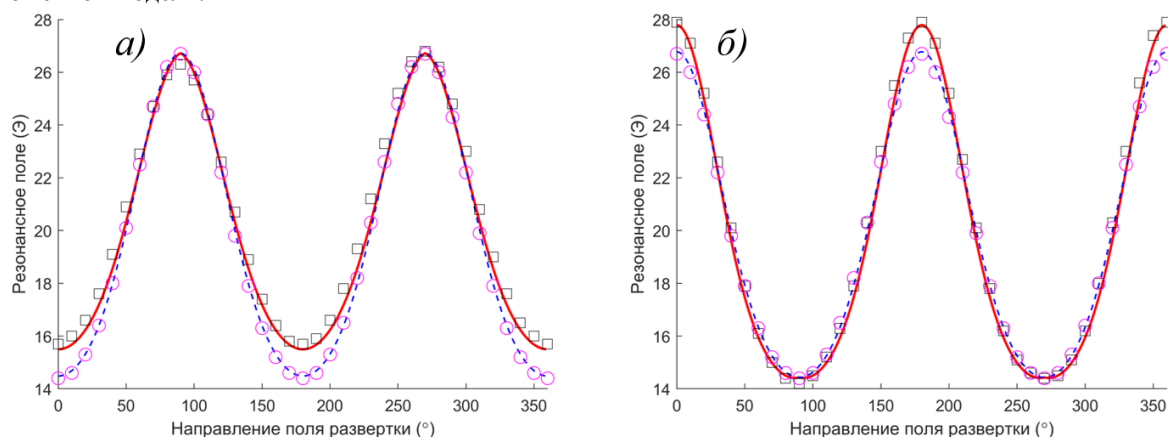


рис.2. Зависимости резонансного поля  $H_R$  от направления поля развертки  $\theta_H$ , маркеры – эксперимент, линии – расчет. Квадратные маркеры и сплошные линии – результаты для края пленки, круглые маркеры и штриховые линии – для центра. а) Результаты для края вдоль  $Ox$ , б) – вдоль  $Oy$ .

Таким образом, в работе показано, что размагничивающие поля, возникающие на краях тонких магнитных пленок, существенно влияют на их характеристики, что имеет важное прикладное значение. В частности, данные краевые эффекты необходимо учитывать при разработке устройств, использующих магнитные пленки в качестве активных элементов, таких как датчики магнитных полей [4], фазовращатели, умножители частоты, и других.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-32-00086.

Список публикаций:

- [1] B.A. Belyaev, A.V. Izotov, A.A. Leksikov, *IEEE Sens.* 5 (2005) 260.
- [2] Б.А. Беляев, В.В. Тюрнев, А.В. Изотов, А.А. Лексиков, *ФТТ*, 58, 56-62 (2016).
- [3] B.A. Belyaev, A.V. Izotov, P.N. Solovlev, *Physica B*, 481, 86-90 (2016).
- [4] Б.А. Беляев, Н.М. Боев, А.В. Изотов, П.Н. Соловьев, В.В. Тюрнев, *Известия вузов. Физика*, 61, 3–10 (2018).